8H

УДК 004.942

Ю.И. Нечаев[1]***, Хейн Тун***[2]
[1]Институт высокопроизводительных вычислений и информационных систем,
[2]Государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

Анализ и прогноз поведения судна в экстремальной ситуации на основе нечеткой системы знаний

Обсуждается проблема повышения надежности принятия решений по обеспечению безопасности эксплуатации судна в экстремальной ситуации. Контроль и прогноз развития ситуации реализуется на основе нечеткой системы знаний. Моделирование осуществлено с использованием метода функционала действия. Особое внимание обращено на поведение судна при периодическом ухудшении остойчивости на волнении.

Введение

Исследование остойчивости судна на попутном волнении при периодическом снижении остойчивости – одно из важных направлений в общей проблеме обеспечения безопасности мореплавания [1-10]. Критические ситуации достаточно подробно изучены с помощью теоретических и экспериментальных методов. [6-8]. Наряду с ситуациями, которые стали типичными при изучении остойчивости на попутном волнении, существует еще одна ситуация, связанная с непрерывным ухудшением начальной остойчивости. Эффект снижения остойчивости в наибольшей степени проявляется у судов с S-образной диаграммой остойчивости. Наличие такой диаграммы при воздействии крупных пакетов нерегулярных волн вызывает резкое ухудшение начальной метацентрической высоты, что приводит к валкости судна. Известны случаи тяжелых аварий, связанных с резким ухудшением остойчивости на волнении. Так, например, в работе [2] описана авария теплохода «Поронайск» на попутном волнении. Возникновению аварийной ситуации предшествовала сильная бортовая качка с амплитудой 30 – 35^{o}, вызванная периодическим снижением начальной остойчивости (начальная метацентрическая высота уменьшалась до – 0,30 м и более при воздействии крутых волн).

В экспериментах с моделью грузового теплохода «Поронайск» на нерегулярном волнении [6] было установлено резкое ухудшение остойчивости, приводившее к валкости судна во время прохождения вершины волны через его мидель. Это способствовало возникновению бортовой качки большой амплитуды (до 30^{o} и более), значительно превышающей величину резонансной амплитуды (около 23^{o}) при положении судна лагом к волнению. Из фрагмента записи изменения во времени начальной метацентрической высоты теплохода «Поронайск» при 8-балльном волнении (рис. 1) очевидно, насколько сильные колебания претерпевает величина в этих условиях. Следует отметить, что чрезмерный крен на попутном волнении отмечался и на других морских судах, для которых характерно резкое уменьшение начальной метацентрической высоты, которое обусловило валкость при прохождении вершины волны через мидель судна [2], [6].

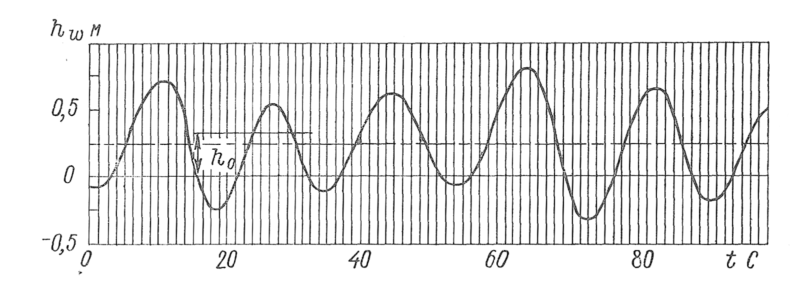


Рисунок 1 – Изменение начальной метацентрической высоты при движении судна на нерегулярном попутном волнении

В докладе обсуждаются особенности построения нечеткой системы знаний бортовой интеллектуальной системы (ИС), функционирующей на основе данных динамических измерений, методов математического моделирования и структурированной базы знаний. При построении нечеткой системы знаний использованы результаты математического моделирования динамики судна при периодическом снижении остойчивости на попутном волнении. Анализ проведен для судна с S-образной диаграммой остойчивости на основе дифференциального уравнения бортовой качки, включающего нелинейную пространственную функцию восстанавливающего момента на волнении. Основное внимание уделено анализу динамических картин поведения судна при различном уровне внешних возмущений.

1. Особенности экстремальной ситуации

Динамика судна на волнении описывается нелинейным дифференциальным уравнением [6]:

$$(Jx + \mu_{\theta\theta})\theta'' + M_R(\theta') + M(\theta,\varphi,t) = M_x(t), \qquad (1)$$

где $(Jx + \mu_{\theta\theta})\theta''$, $M_R(\theta')$, $M(\theta,\varphi,t)$, $M_x(t)$ – функции, описывающие судна как динамическую систему (инерционные, демпфирующие, восстанавливающие и возмущающие компоненты).

Наиболее сложной функцией в (1) является восстанавливающая компонента, входящая в дифференциальное уравнение бортовой качки. Восстанавливающая компонента отличается существенной нелинейностью, сложностью и многозначностью. Непрерывно изменяясь во времени и пространстве, эта функция в значительной степени определяет результат интегрирования системы (1) при изучении физических картин взаимодействия судна с внешней средой.

Математическое описание нелинейной пространственной функции восстанавливающего момента на волнении представляется формулой [6]:

$$M_W = M(\theta,\varphi,t) = D\,[l(\theta,\varphi) + \Delta l(\theta,\varphi)\cos(\sigma_k t - \varepsilon)]; \qquad (2)$$

$$l(\theta,\varphi) = 0{,}5\left[l(\theta,\varphi)_{\max} + l(\theta,\varphi)_{\min}\right], \quad \Delta l(\theta,\varphi) = 0{,}5\left[\Delta l(\theta,\varphi)_{\max} + \Delta l(\theta,\varphi)_{\min}\right];$$

$$M_W = \Phi(\theta,\varphi_k,t) = D\,l(\theta,\varphi,t),$$

где $\Delta l(\theta,\varphi)_{max}$ и $\Delta l(\theta,\varphi)_{min}$ – экстремальные значения приращений плеч остойчивости, соответствующие положению судна на подошве и вершине волны при различных курсовых углах φ; $l(\theta,\varphi,t)$ – плечо восстанавливающего момента, определяемого для различных моментов времени, ε – фаза: $\varepsilon = 0$ и 2π – судно на подошве волны; $\varepsilon = \pi/2$ – на переднем склоне; $\varepsilon = \pi$ – на вершине волны; $\varepsilon = 3/2\pi$ – на заднем склоне.

Общее выражение функции приращения плеча остойчивости $\Delta l_w(h_w/\lambda,\theta,\varphi)$, определяющее влияние волнения при различных параметрах формы корпуса и числа Фруда, в диапазоне углов крена до 60° включительно и φ = 0÷45° имеет вид:

$$\Delta l_W(h_W/\lambda,\theta,\varphi) = B[\Phi\left(\frac{h_W}{\lambda},\theta,\varphi_k\right) + \sum_{m=1}^{6} A_m f_m(\theta,\varphi_k) + \\ + \sum_{n=1}^{8} B_n F_n(\theta,\varphi_k) + \sum_{p=1}^{3} C_p E_p(\theta,\varphi_k)], \quad (3)$$

$$\Phi(h_W/\lambda,\theta,\varphi_k), \ \sum_{m=1}^{6} A_m f_m(\theta,\varphi_k), \ \sum_{n=1}^{8} B_n F_n(\theta,\varphi_k), \ \sum_{p=1}^{3} C_p E_p(\theta,\varphi_k).$$

Входящие в модель (2) функции характеризуют данные стандартных моделей и суммы поправок на влияние линейных, квадратичных и кубических членов разложения ряда Тейлора на величину приращения плеча остойчивости, определяемого с учетом дифракционной и интерференционной составляющих при движении судна с произвольным курсовым углом на волнении. Геометрическая интерпретация функции M(θ,φ,t) в виде сложной пространственной поверхности дана на рис. 2.

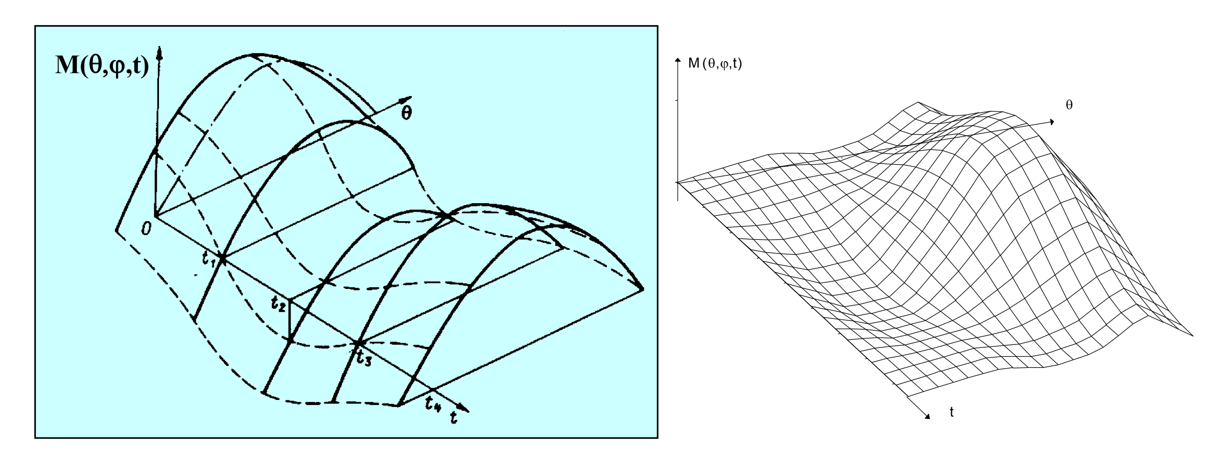


Рисунок 2 – Изменение нелинейной функции, описывающей восстанавливающий момент на волнении: сплошные кривые – мгновенные диаграммы остойчивости; пунктир – временные кривые (сечения поверхности при θ = const); штрих-пунктир – диаграмма остойчивости на тихой воде

Вычислив приращения Δl_w в необходимом диапазоне углов крена, нетрудно установить плечи остойчивости l_w и построить соответствующие диаграммы для положения судна на вершине и подошве волны по формуле $l_w = l+\Delta l_w$, где l – плечо остойчивости, полученное обычным расчетом на тихой воде. При расчете на ЭВМ исходную формулу для l_w удобно записать в виде

$$l_w = l + B\left(\Phi_{jk} + \sum_{i=1}^{17} A_i f_{ijk}\right), \quad (4)$$

где значения A_i принимаются равными:

$A_1^* = L/B - 4.82$, $A_2^* = B/T - 2.67$, $A_3^* = H/T - 1.3$,
$A_4^* = к - 0.7$, $A_5^* = \varphi - 0.692$, $A_6^* = Fr - 0.28$, (5)
$A_7 = B_1 = A_1^2$, $A_8 = B_2 = A_2^2$, $A_9 = B_3 = A_3^2$, $A_{10} = B_4 = A_5^2$, $A_{11} = B_5 = A_6^2$, $A_{12} = B_6 = A_1A_2$,
$A_{13} = B_7 = A_2A_4$, $A_{14} = B_8 = A_1A_6$, $A_{15} = C_1 = A_2^3$, $A_{16} = C_2 = A_3^3$, $A_{17} = C_3 = A_5^3$;

где i, j, k – счетчики циклов: i определяет номер поправки на отклонение характеристик формы корпуса и числа Фруда от данных стандартной модели, θ – углы крена, φ – курсовые углы.

2. Нечеткая формальная система знаний

При функционировании ИС обеспечивается контроль ситуации и выработка практических рекомендаций для принятия решений по выбору оптимального режима движения в зависимости от интенсивности внешних возмущений. Процесс управления организуется в рамках концепции «мягких вычислений» [10]. Управляющий алгоритм представляется набором логических правил «IF – THEN» [1], [8]. В качестве текущей информации используются показания датчиков колебательного движения судна при бортовой и килевой качке.

В бортовых ИС находят применение модели нечеткого вывода, основанные на различных формальных конструкциях, обеспечивающих разрешение нечетких логических правил. При реализации измерительной и экспертной информации в ИС применяются правила нечеткого вывода, использующие принцип обобщения Л. Заде для нечеткого вывода, в котором высказывания моделируются нечеткими множествами, позволяющими вывести нечеткое заключение. Основная проблема реализации нечеткого управления в бортовых ИС заключается в построении функций принадлежности (ФП), особенно в условной части логического правила, содержащего несколько нечетких переменных. Построение ФП осуществляется на основе обработки измерительной и экспертной информации, а также материалов конкретного проекта судна. При этом реализуются два подхода. Первый подход состоит в формализации нечетких знаний в процессе разработки ИС. Он основан на традиционном представлении экспертных знаний и предусматривает построение ФП базовых правил, «зашитых» в программный комплекс. Второй подход реализуется в процессе функционирования ИС и связан с построением текущих значений ФП на основе данных динамических измерений. Алгоритмы и программное обеспечение построения ФП основаны на использовании статистических методов и нейросетевых технологий [7].

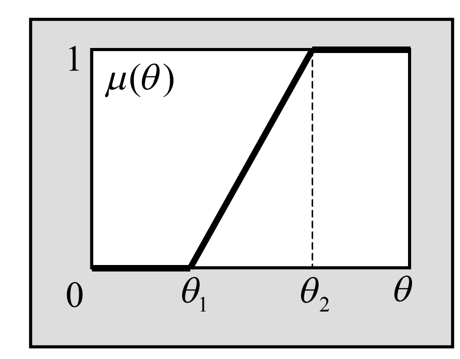
Композиционная модель нечеткого вывода описывает связь всех возможных состояний логической системы с управляющими воздействиями и формально записывается в виде (X,R,Y), где $X = \{x_1,\dots,x_n\}$; $Y = \{y_1,\dots,y_m\}$ – базовые множества, на которых заданы входы A_i и выходы B_i нечеткой системы; R – нечеткое соответствие «вход – выход», которое строится на основе формализации нечетких стратегий. Принятие решений при функционировании нечеткой системы знаний осуществляется на основе модели [1], [8]:

$$\text{«if } A_1 - \text{then } B_1, \text{ else if } A_2 \text{ then } B_2,\dots, \text{ else if } A_N \text{ then } B_N\text{».} \quad (6)$$

Здесь $A_1,\dots,A_N$ – нечеткие подмножества, определенные на базовом множестве X, а $B_1,\dots,B_N$ – нечеткие подмножества из базового множества Y.

Антецедент импликации X представляет собой проверку выполнения условий, $<X_1$ is A_1 & X_2 is $A>$, сформулированных на основе соотношений (11). Консеквент импликации Y(Z) определяет возникновение экстремальной ситуации и выработку соответствующих практических рекомендаций, в том числе и выполнение операций по моделированию и визуализации ситуации. Функции принадлежности, характеризующие условия возникновения экстремальной ситуации, представлены на рис. 3. Здесь

значения θ_1 и θ_2 характеризуют диапазон перехода к полной потере начальной остойчивости, Δh_1 и Δh_2 – соответствующие значения приращений метацентрической высоты в момент прохождения вершины волны через мидель судна.



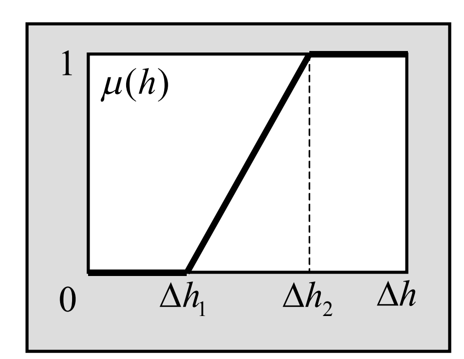


Рисунок 3 – Функции принадлежности антецедентной части логического правила, описывающего возникновение рассматриваемой экстремальной ситуации

Для решения задач принятия решений на основе априорной информации используется нечеткая формальная система, обеспечивающая принятие решений при выборе альтернатив [8] в рамках концепции мягких вычислений soft computing [10]. Формирование такой системы осуществлено на основе принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [7].

Нечеткая формальная система разработана с учетом динамики изменения предметной области в процессе функционирования ИС. Структура расширенной нечеткой системы (Extended Fuzzy System – EFS) представляется в виде матрицы переходов, строками которой являются пары [3]:

$$(EFS_i, \langle T_i, S_j \rangle; i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,m), \quad (7)$$

где EFSi – расширенная нечеткая формальная система; $\langle T_i, S_j \rangle$ – пара, задающая максиминную операцию, используемую в основе композиционного правила вывода (обобщенный *modus ponens*); T_i – оператор минимума (Т-норма); Sj – оператор максимума (Т-конорма).

Пересечение строки EFS_k и столбца EFS_p матрицы переходов обозначается символом «X» и указывает на возможность выполнения максиминной операции, определяемой парой $\langle T_i, S_j \rangle$. Эта операция сменяется на максиминную операцию, заданную парой $\langle T_m, S_n \rangle$. Условия переходов определяются заранее при разработке нечеткой формальной системы.

При разработке нечеткой модели знаний учитывалась возможность переходов от одной расширенной нечеткой формальной системы к нескольким подобным системам, которые могут создаваться и удаляться в процессе эксплуатации на основе моделирования динамики судна в рассматриваемой экстремальной ситуации. В этом случае двумерная матрица переходов заменяется на трехмерный куб переходов, располагаясь вдоль осей X,Y,Z соответственно:

– X – множества $\{EFS_1,\dots,EFS_n\}$;
– Y – множество Т-норм;
– Z – множество Т-конорм.

При функционировании ИС происходит накопление новой информации и корректировка базы знаний. Динамическая база знаний совершенствуется и расширяется за счет включения новых моделей.

3. Математическое моделирование динамики судна в условиях непрерывного изменения поперечной метацентрической высоты судна на волнении

В процессе моделирования исследовалось влияние параметров волнения на изменение мгновенных ординат диаграммы остойчивости $l(\theta,t)$ в условиях развития шторма. Экстремальные значения ординат этих диаграмм устанавливались для различных значений крутизны волны $(\lambda/h_W)_t$, величина которой постепенно увеличивалась по мере прохождения пакетов волн в моменты времени t_0, t_1,…, t_n. Приращение начальной метацентрической высоты Δh вычислялось по формуле:

$$\Delta h = h_0 - (\Delta h_w)_{min}, \quad (8)$$

где $(\Delta h_w)_{min}$ – мгновенное значение метацентрической высоты при положении судна на вершине волны, определенное на основе математической модели (2) – (4).

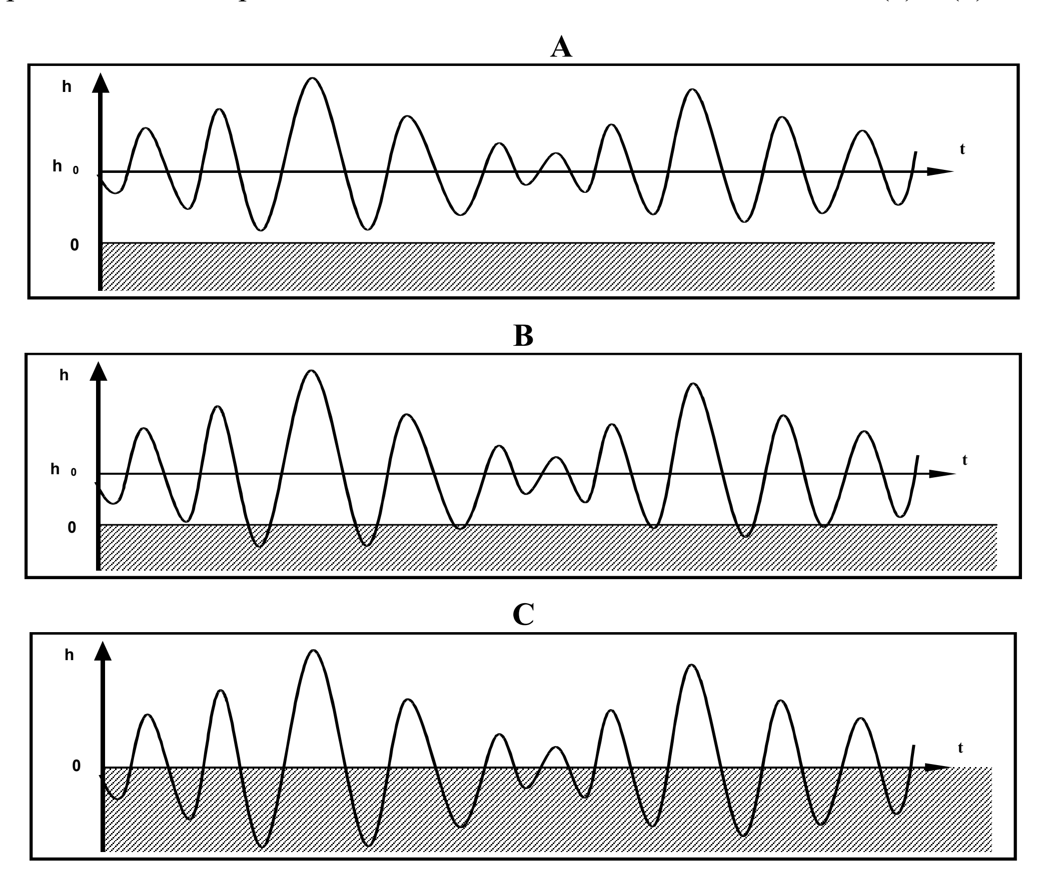


Рисунок 4 – Кривые изменения метацентрической высоты для различного уровня внешних возмущений: А – случай нормальной эксплуатации (явление валкости не проявляется); В – типичная ситуация, когда при воздействии пакета волн появляются отдельные отрицательные значения метацентрической высоты; С – предельный случай, соответствующий полному ухудшению начальной остойчивости

Сценарии исследуемых ситуаций предусматривали также различные случаи поведения судна при смещении груза вследствие резкого снижения начальной остойчивости. Особое внимание обращалось на трансформацию диаграммы остойчи-

вости при прохождении вершины волны через мидель судна в условиях интенсивных волновых возмущений. На основе результатов моделирования сформулирован критериальный базис, обеспечивающий предотвращение возникновения опасных ситуаций вследствие резкого уменьшения начальной метацентрической высоты при движении судна на попутном волнении. Критерии остойчивости использованы при разработке базы знаний бортовой ИС контроля динамики судна на волнении с учетом расширения нечеткой формальной системы.

Результаты моделирования экстремальных ситуаций при движении судна на нерегулярном попутном волнении представлены на рис. 4. Здесь отобраны три характерные ситуации, которые могут наблюдаться в условиях эксплуатации исследуемого судна. Они представляют собой нестационарные режимы колебаний метацентрической высоты под воздействием случайных возмущений (прохождение пакетов волн с непрерывно увеличивающейся крутизной). Штриховкой на этих рисунках указана область отрицательных значений метацентрической высоты.

Результаты моделирования показали, что возникновение «раскачивающего эффекта», обусловленного валкостью судна, обнаруживается в ситуациях, когда величина начальной метацентрической высоты судна с S-образной диаграммой остойчивости и соотношения параметров развивающегося волнения, представленного в виде пакетов нерегулярных волн, достигают следующих значений:

$$h_0 \le 0{,}3 \text{ м}, \ \lambda / L = 0{,}8 \div 1{,}3, \ h_W/\lambda \ge 0{,}08. \qquad (8)$$

Оценка устойчивости колебательного движения судна в условиях периодического ухудшения начальной остойчивости осуществлялась на основе метода функционала действия [10]. Разработанный алгоритм позволяет вычислить вероятность опрокидывания по мере развития колебаний судна, вызванных появлением отрицательных значений метацентрической высоты.

Стохастический алгоритм, реализующий последовательность операций при выполнении процедур метода функционала действия, представлен на рис. 5. Здесь $M_J(\theta'')$, $M_R(\theta')$, $M(\theta,\varphi,t)$, $M(t)$ – инерционно-демпфирующие, восстанавливающие и возмущающие компоненты математической модели; ξ – компонента гауссовского случайного процесса $\xi(t)\in R^2$, формирующий фильтр которого определяется параметрами доминирующей частоты ω и шириной спектра возмущений E; $v(t)$ – «белый шум» малой интенсивности; w – винеровский случайный процесс; ε – малый параметр; $\partial\Omega$ – область неустойчивости.

Анализ устойчивости колебательных режимов качки корабля на волнении в условиях периодического снижения начальной метацентрической высоты позволил установить ряд характерных закономерностей динамики исследуемой нелинейной системы. Эти закономерности определяются особенностями групповой структуры набегающих волн и интенсивностью колебательных режимов. Результаты вычислительных экспериментов позволяют построить и проанализировать траектории динамической системы на фазовой плоскости [6], [7], [9]. Наиболее типичными колебательными режимами являются случаи возникновения аттракторов, описывающих динамику одностабильной, бистабильной и трехстабильной систем [8], а также характерные временные кривые и одномерные отображения из точек, соответствующих максимальным значениям амплитуды для (n + 1) и n-го интервалов времени для аттракторных множеств [4], [5].

- **Исходная модель**

$$(J_x + \mu_{\theta\theta})\theta'' + M_R(\theta') + M(\theta,\varphi,t) = M(t)$$

- **Формальная модель**

$$y(t) = b(y(t))) + \sigma(y(t))v(t);\ y(t) = (\theta'', \theta', \xi_1, \xi_2)^T \in R^4$$

$$v(t) = \omega'(t),\ \varepsilon > 0;\ \xi'(t) = F\xi(t) + G\,v(t),\ \xi(0) = \xi_0$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ f_1 & f_2 \end{bmatrix},\ G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix},\quad g1 = 1,\ g_2 = \sqrt{(\omega^2 + E^2)} - 2E;\quad f_1 = -2E,\ f_2 = -\omega^2 - E^2.$$

- **Реализация алгоритма**

$\forall t \in [t_0,T]$ найти t_f и управление U из заданного класса непрерывных по $[t_0,T]$ функций, обеспечить граничные условия и $y(0) = y_0$, $y(t) \in \partial\Omega$ и минимизировать функционал

$$J(t) = \frac{1}{2}\int_0^T v^T(t)v(t)dt$$

- **Вероятность опрокидывания**

$P(y(t) \in \partial\Omega)$ определяется асимптотическим соотношением

$$\lim_{\varepsilon \to 0} \varepsilon^2 \ln P\{y(t) \in \partial\Omega\} = -\min J(t)$$

- **Графическая интерпретация**

Результаты моделирования – в виде зависимостей θ (t), P(t) в области устойчивости Ω = f (v,φ)

Рисунок 5 – Алгоритм, реализующий последовательность операций на основе метода функционала действия

Интересная закономерность, установленная в процессе вычислительного эксперимента, заключается в моделировании пространственно-временного поведения судна на базе центральной теоремы синергетики, определяющей динамику сложной системы как взаимосвязь растущих и затухающих ее конфигураций с параметрами порядка [4], [5]. Установлено, что все исследуемые пространственно-временные состояния системы управляются параметрами порядка (принцип подчинения). Переход к параметрам порядка в сложной системе приводит к сжатию информации и к значительному сокращению числа степеней свободы. При этом параметры порядка определяют движение элементов системы, которые, в свою очередь, совместно (кооперативно) характеризуют действие параметров порядка (принцип круговой причинности) [4].

Заключение

Таким образом, технология обработки информации в бортовых ИС при анализе и прогнозе динамики судна в условиях непрерывного изменения метацентрической высоты имеет следующие преимущества:

1. Расширение традиционных подходов к обработке информации в сложных динамических средах, дополнение их новыми методами, моделями и алгоритмами поддержки принятия решений по управлению судном в сложной гидрометеорологической обстановке.

2. Учет неопределенности и неполноты исходной информации при контроле ситуации и выборе решений по управлению судном в условиях непрерывного изменения метацентрической высоты.

3. Развитие внутреннего потенциала теории принятия решений на основе принципа конкуренции, позволяющего на базе анализа альтернатив выбирать предпочтительную вычислительную технологию с использованием методов классической математики и нечетких моделей.

Литература

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / [Аверкин А.Н., Батыршин А.Н., Блишун А.Ф. и др.] ; под ред. Д.А. Поспелова. – М. : Наука, 1986.
2. Аксютин Л.Р. Аварии судов от потери остойчивости / Л.Р. Аксютин, С.Н. Благовещенский. – Л. : Судостроение, 1975.
3. Головина Е.Ю. Интегрированное инструментальное средство для создания нечетких динамических систем поддержки принятия решений / Е.Ю. Головина // Труды 7-й национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ- 2000. – Т. 2. – С.448-456.
4. Лоскутов А.Ю. Введение в синергетику / А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов. – М. : Наука, 1990. – 272 с.
5. Неймарк Ю.И.Стохастические и хаотические колебания / Ю.И. Неймарк, П.С. Ланда. – М. : Наука, 1987.
6. Нечаев Ю.И. Моделирование остойчивости на волнении / Ю.И. Нечаев. – Л. : Судостроение, 1989.
7. Нечаев Ю.И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени / Ю.И. Нечаев // Лекции по нейроинформатике. Часть 2 : труды 5-й Всероссийской конференции «Нейроинформатика-2003». – М. : МИФИ, 2003. – С. 119-179.
8. Нечаев Ю.И. Концептуальные основы создания бортовых интеллектуальных систем / Ю.И. Нечаев // Информационно-измерительные и управляющие системы. Часть 2. Корабельные системы. – 2006. – № 9. – С. 39-49.
9. Nechaev Yu.I. Probability-asymptotic methods in ship dynamic problem / Yu.I. Nechaev, S.A. Dubovik // Proceedings of 15th international conference on hydrodynamics in ship design, safety and operation. – Gdansk, 2003. – P. 187-199.
10. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing / L. Zadeh // Commutation on the ASM. – 1994. – Vol. 37, № 3. – P. 77-84.

Ю.І. Нечаєв, Хейн Тун

Аналіз і прогноз поведінки судна в екстремальній ситуації на основі нечіткої системи знань

Обговорюється проблема підвищення надійності прийняття рішень із забезпечення безпеки експлуатації судна в екстремальній ситуації. Контроль і прогноз розвитку ситуації реалізується на основі нечіткої системи знань. Моделювання здійснено з використанням методу функціонала дії. Особливу увагу звернено на поведінку судна при періодичному погіршенні остійності на хвилюванні.

Yu.I. Nechaev, Hein Tun

The Analysis and Forecast of Ship Behavior in Extreme Situation on the Basis of Fuzzy Knowledge System

The problem of increase of reliability of acceptance of the decisions on a safety of ship operation in an extreme situation is discussed. The control and forecast of development of a situation is realized on the basis of fuzzy knowledge system. The modeling is carried out with use of a the functional action method The special attention is inverted on ship behavior at periodic deterioration stability on waves.

Статья поступила в редакцию 25.05.2009.